

# L'analyse statistique de données appliquée à la surveillance multi-paramètres de versants instables

E. Klein & A. Durenne

INERIS, Campus ARTEM, CS 14234, Nancy Cedex, France

Y. Gueniffey

Laboratoire Géoressources, Ecole des Mines, Campus ARTEM, CS 14234, Nancy Cedex, France

**Résumé :** L'observation et la surveillance des instabilités de pentes et versants par des approches multi-paramètres nécessitent la mise en œuvre d'outils d'analyse statistique de données. Dans un contexte où les mécanismes de déformation sont complexes leur mise en œuvre reste incertaine. En revanche, ils peuvent contribuer efficacement à la détection de situations à risque.

## 1 INTRODUCTION

La difficulté à modéliser les mécanismes de rupture de mouvements de versants de grande ampleur limite fortement les capacités d'anticipation et d'alerte des dispositifs basés sur des critères de détection déterministes simples. Aussi, pour faire face à la diversité et la complexité des situations d'aléas gravitaires rencontrées, les approches multi-paramètres d'observation et de surveillance se développent de plus en plus, notamment grâce aux évolutions technologiques récentes. Il est aujourd'hui courant de collecter de manière synchronisée de nombreux types de données de mesure : mécaniques, hydrologiques, géodésiques, météorologiques, sismiques et microsismiques. L'enjeu des travaux actuels concerne donc l'exploitation automatique en routine des séries chronologiques ainsi collectées et notamment la mise en œuvre d'outils et méthodes d'analyse statistique permettant d'établir des lois probabilistes d'occurrence de l'aléa redouté ou tout au moins une détection fiable des situations à risque.

Dans cet article nous présentons la démarche mise en œuvre pour l'analyse statistique des données multi-paramètres acquises par l'INERIS sur le mouvement de versant de *Séchilienne* (Isère, France) entre le 20 novembre 2009 et le 30 juin 2013. Nous décrirons d'abord brièvement le site d'étude, les données disponibles ainsi que le travail de conditionnement et de préparation de ces données préalable à l'étude statistique. Nous présenterons ensuite les résultats de cette étude statistique, notamment la corrélation entre les différentes variables mesurées ainsi que la détection de singularités dans les séries chronologiques. Enfin, nous discuterons de la faisabilité du transfert des outils statistiques mis en œuvre vers l'outil de web-monitoring de l'INERIS utilisé pour le suivi et le partage, en quasi-temps réel, des données d'observations et de surveillance multi-paramètres à l'ensemble des acteurs des projets de surveillance, dont celui de *Séchilienne*.

## 2 PRESENTATION DU SITE, DES DONNÉES MULTI-PARAMÈTRES ET DE LA MÉTHODE

### 2.1 Présentation du site

Le mouvement de versant de *Séchilienne* (Isère, 38) se situe sur le versant Sud du *Mont Sec* à l'extrémité Sud-ouest du massif cristallin de *Belledonne* dans les Alpes occidentales. La zone en mouvement concerne une surface de l'ordre de 70 hectares qui comprend un secteur particulièrement instable (la zone dite des Ruines) ; elle présente un mécanisme complexe d'évolution qui se traduit par un phénomène irréversible et continu de désagrégation et désorganisation du massif.

L'accroissement des éboulements observés sur le site dans les années 1980 a conduit à la mise en œuvre d'un dispositif de surveillance et d'alerte. Celui-ci est opéré depuis 1985 par le CETE de Lyon ; il repose principalement sur des mesures de déplacements de surface acquises selon différentes techniques (extensométrie, distancemétrie radar et distancemétrie infrarouge, photo-vidéo) qui visent à fournir une résolution temporelle et spatiale permettant de quantifier la cinématique 3D des mouvements (Chanut et al. 2013).

Depuis 2009, l'INERIS assure le suivi d'un dispositif d'observations multi-paramètres placé en bordure Ouest du secteur particulièrement instable (Figure 1). Ce dispositif combine des mesures de type microsismique, géotechnique, géodésique et météorologique (Dünner et al. 2011), avec des instruments placés dans la galerie de reconnaissance, dans le forage SD et en surface.

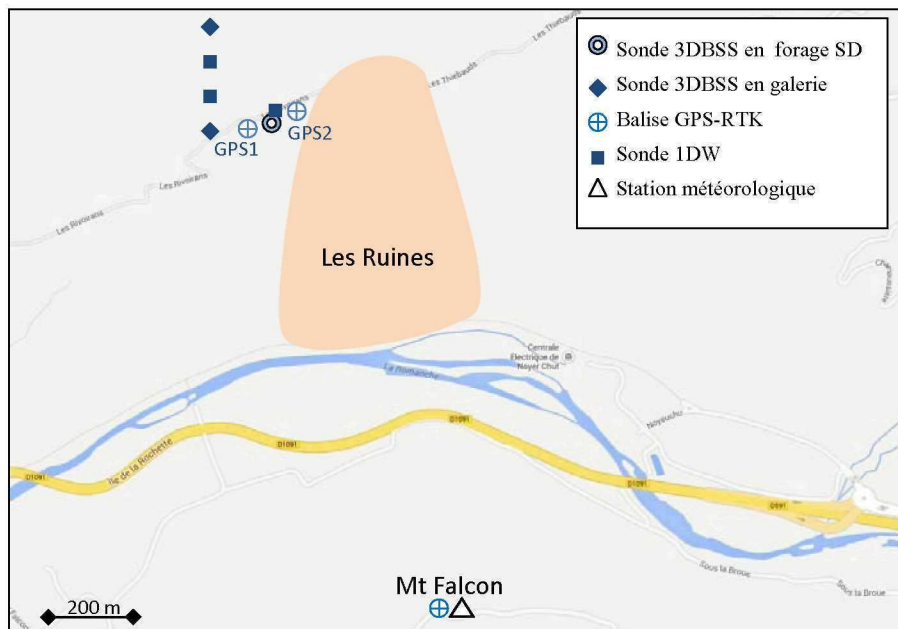


Figure 1. Plan de situation des équipements de mesure sur le mouvement de versant de *Séchillienne* (fond de carte ©Google)

## 2.2 Données utilisées

La figure 2 présente les séries chronologiques utilisées dans cette étude. Sur la période considérée, le fonctionnement du dispositif est globalement très bon (il est de 93%). L'acquisition microsismique repose sur des critères de dépassement de seuils en amplitude, sachant que le niveau de bruit est faible (inférieur à  $3.10^{-4} \text{ mm.s}^{-1}$ ) et que l'étendue de mesure (hors saturation) est de  $\pm 2 \text{ mm.s}^{-1}$ . Les sismogrammes enregistrés sont classifiés selon un catalogue qui comprend trois principales signatures (Dünner et al. 2010) : des événements isolés, des tremors et des chutes de blocs en galerie. Les mesures de déplacements par GPS différentiel précis (RTK) sont effectuées 2 à 4 fois par jour selon des cycles de mesure de 30 minutes avec une précision de  $\pm 10 \text{ mm}$  dans les trois directions et ce sans traitement a posteriori. La convention de signe est telle qu'une variation positive en latitude indique un déplacement vers le Nord, une variation positive en longitude un sens de mouvement vers l'Est. Les mesures météorologiques enfin (précipitations, températures de l'air et du sol, pression atmosphérique) sont relevées 4 fois par jour à la station météorologique positionnée sur le versant opposé (au *Mt Falcon*).

Sur cette figure 2 on observe visuellement une concomitance entre les pics d'activité microsismique et les accélérations de déplacement en surface. Ces pics et accélérations interviennent par ailleurs souvent durant ou après des épisodes pluvieux ou neigeux importants. Par exemple, la crise microsismique majeure est observée en novembre 2012 qui est le mois le plus pluvieux de la période. C'est également à cette période que les vitesses de déplacement en surface sont les plus importantes (jusqu'à  $3 \text{ cm/j}$  en moyenne).

## 2.3 Préparation et conditionnement des données pour l'étude statistique

Le processus d'analyse des séries chronologiques n'est pas immédiat car les séries présentent des données manquantes (du fait de pannes techniques ou d'échecs de mesure) et des données aberrantes. Les données d'observations multi-paramètres peuvent comme dans le cas présent être acquises à des pas de temps différents, voire irréguliers. C'est le cas par exemple pour les données microsismiques qui sont par nature irrégulières puisqu'elles résultent de l'écoute passive des phénomènes de fracturation et de fissuration des massifs rocheux. Un changement de régime microsismique peut par ailleurs résulter d'une modification des critères de déclenchement. Ainsi un abaissement de ces critères peut se traduire par une activité apparente plus soutenue. L'analyse statistique requiert donc du recul sur les données de mesure, les incertitudes associées ou encore sur la résolution des techniques instrumentales déployées. Pour les aléas gravitaires, cette analyse doit également être capable de prendre en compte les variations environnementales observées sur de longues durées, comme celles induites par le changement climatique par exemple.

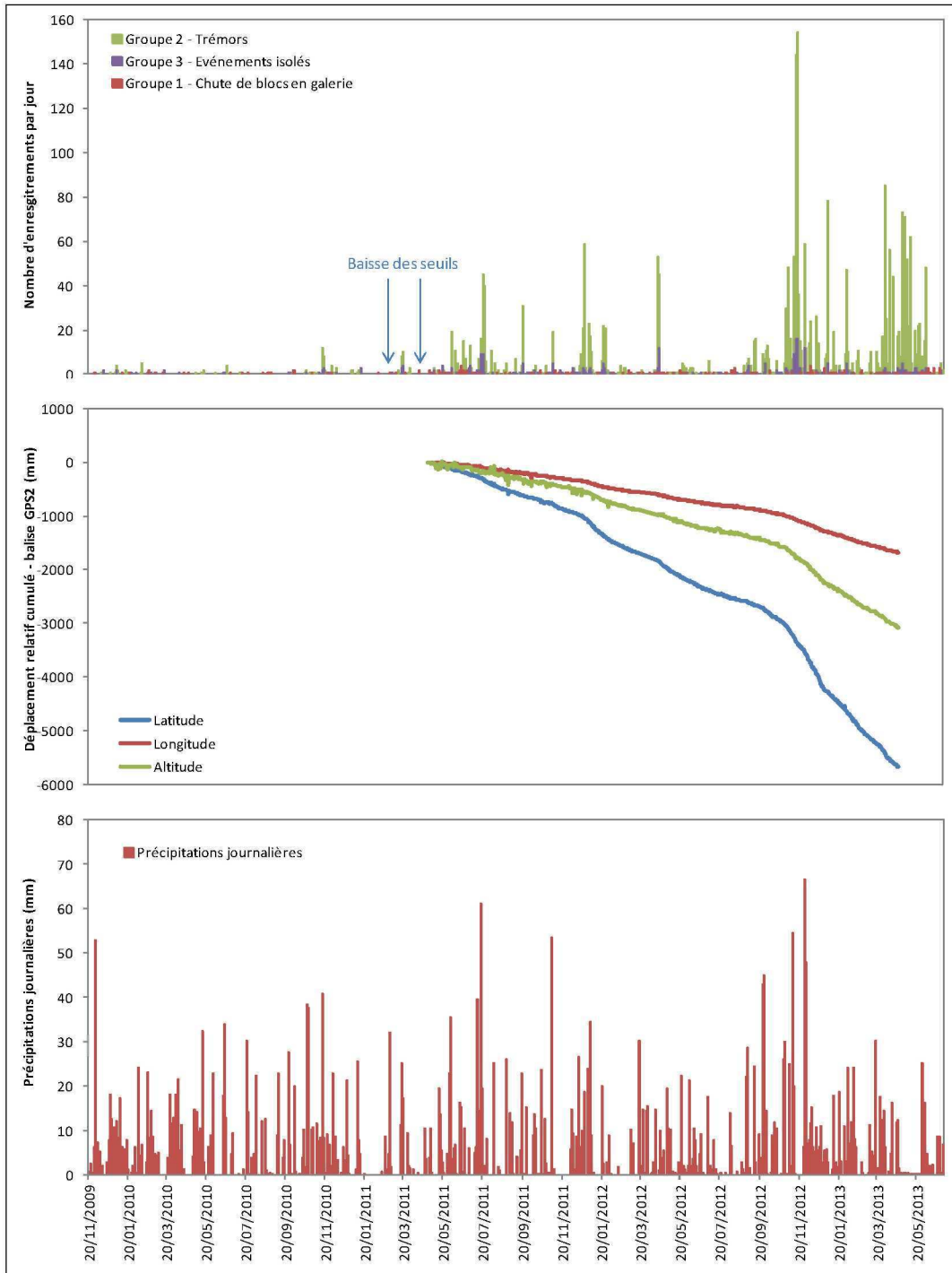


Figure 2. Activité microsismique journalière, déplacement cumulé à la balise GPS- RTK 2 et précipitations journalières du 20/11/2009 au 30/06/2013. La balise GPS-RTK 2 a été installée fin avril 2011 et déplacée fin avril 2013.

Dans le cas présent, compte tenu des fréquences d'acquisitions géotechniques et géodésiques, il a été décidé de travailler à un pas de temps journalier. Le travail de préparation des données s'est déroulé en trois étapes principales. La première a porté sur les mesures géotechniques et géodésiques : les mesures aberrantes ont été rejetées, les données manquantes ont été ajoutées et les valeurs manquantes estimées, puis pour ne conserver qu'une valeur par jour le maximum des valeurs absolues journalières a été utilisé. La seconde étape a porté sur les données météorologiques, notamment les mesures de précipitations brutes : les quelques valeurs aberrantes ou manquantes sur la période ont été remplacées par des mesures réalisées par le CETE à proximité du site. La valeur journalière retenue pour l'étude statistique est le cumul journalier des précipitations. Enfin, s'agissant des données microsismiques l'étude se limite ici au nombre journalier d'événements détectés sur la période. Cette série chronologique est considérée comme homogène sur la période car il y a eu très peu de changements de seuils de déclenchement (excepté au début du suivi voir Figure 2) et extrêmement peu d'interruptions d'acquisition sur la période.

## 2.4 Modélisation et corrélation croisée des séries chronologiques

L'approche mise en œuvre est celle proposée par Hipel et McLeod (1995) dont les travaux portent sur l'analyse statistique de données environnementales. Cette méthode permet de modéliser la relation éventuelle entre une (des) série(s) chronologique(s) dites d'« entrée » sur une série chronologique dite de « sortie ». La première étape consiste à établir un modèle ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) satisfaisant de la série d'entrée : c'est ce qu'on appelle le « pré-blanchiment » de la série. On applique ensuite ce modèle à la série de sortie, et c'est alors seulement qu'on peut établir le corrélogramme croisé des deux séries. L'étude de ce corrélogramme permet alors d'identifier le retard éventuel (première corrélation significative) de l'action de la série d'entrée sur la série de sortie, et la durée de cet effet (nombre de corrélations significatives contigües).

Pour expliquer par exemple les déplacements de surface par les précipitations, la série des précipitations est d'abord modélisée par des modèles de type ARIMA. Comme plusieurs modèles peuvent convenir, on retient le modèle dont le critère BIC est le plus faible (Box et al. 2008) ; il est ensuite appliqué à la série que nous cherchons à expliquer : celles des déplacements. Au terme de ce processus l'étude des co-variations entre déplacements et précipitations peut être menée. La même démarche est ensuite reproduite pour chaque cas de figure étudié. Dans la suite, les corrélations entre les variables sont considérées comme statistiquement significatives au seuil de 5%.

## 2.5 Détection de situations à risque

L'approche mise en œuvre vise à évaluer la possibilité de détecter des situations à risque en matérialisant des ruptures de pente sur les séries chronologiques cumulées de la microsismicité et des déplacements 3D (la série chronologique des précipitations n'est pas considérée ici car elle ne présente pas de changements structurels dans le temps). Il existe dans la littérature de nombreuses techniques qui permettent cette détection. Compte tenu de la spécificité des chroniques cumulées qui sont par nature monotone croissante, notre choix s'est porté sur l'analyse de la dérivée et de la dérivée seconde. Elles sont utilisées pour repérer les points d'inflexion qui marquent le passage de la concavité à la convexité ou l'inversement. Pour la détection de situation à risque on s'intéresse ici uniquement à la détection des segments convexes.

## 3 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE

### 3.1 Relations entre microsismicité, déplacement en surface et précipitations

Les principaux résultats issus des corrélations entre les précipitations et les variables caractéristiques de l'évolution de l'aléa sont présentés dans le Tableau 1. Les coefficients des corrélations lorsqu'elles existent sont faibles en absolu mais très nettement supérieurs au seuil de significativité à 5% ( $1,96/\sqrt{n}$ ,  $n$  étant le nombre de points des séries).

Tableau 1. Résultats des corrélations entre les précipitations journalières cumulées et les variables caractéristiques de l'évolution de l'aléa. Oui indique une corrélation statistiquement significative, non l'absence de corrélation.

Variable corrélée avec les précipitations	Corrélation	Coefficient de corrélation	Seuil de Significativité
Microsismicité	oui, sans retard	0,18	0,054
Chute de Blocs en galerie	non	-	-
Trémors	oui, sans retard	0,15	0,054
Événements isolés – massif	oui, sans retard	0,34	0,054
Déplacement 3D – GPS1	non	-	-
Déplacement 3D – GPS2	non	-	-
Latitude – GPS2	non	-	-
Longitude – GPS2	oui, avec retard de 2 jours	0,20	0,073
Altitude – GPS2	non	-	-

La microsismicité est corrélée sans retard avec les précipitations ce qui signifie que l'apport en eau dans les terrains a un effet immédiat significatif sur l'activité microsismique, notamment sur le sous-groupe d'événements isolés associés aux ruptures en profondeur (coefficient de corrélation de 0,34). Ces résultats sont globalement comparables voire meilleurs à ceux obtenus par Helmstetter et Garambois (2010) : la corrélation est ici améliorée lorsqu'on ne considère que le groupe d'événements isolés attribués aux ruptures dans les terrains.



Une corrélation avec un retard de deux jours est trouvée entre le déplacement en longitude de la balise GPS2 et les précipitations : l'effet de l'apport en eau sur le déplacement en longitude apparaît 2 jours après l'occurrence des précipitations. Le déplacement en latitude, qui domine pourtant le mouvement, n'est pour sa part pas corrélé aux précipitations.

Cette absence de corrélation forte et directe entre les déplacements de surface et les précipitations est aussi constatée par Chanut et al. (2013). Pour optimiser l'étude statistique, ces auteurs mettent en œuvre un modèle de réservoir pour tenter de rendre compte de la commande hydraulique qui s'exerce sur le mouvement de versant de *Séchilienne*. Ils considèrent aussi la pluie efficace plutôt que les précipitations, qui est plus représentative des apports en eau dans les terrains (Vallet et al. 2013). Ce modèle est ensuite calé sur une période de 2,5 ans (entre mai 2003 et décembre 2005) avec des agrégations de données sur plusieurs semaines. Ainsi ces auteurs obtiennent des corrélations entre pluie efficace et mesures d'extension en surface avec un coefficient de corrélation de 0,6.

Avec l'approche de Hipel et McLeod (1995), c'est-à-dire sans agrégation des données ni modèle physique complémentaire, la corrélation des déplacements ou de la microsismicité journalière avec la pluie efficace estimée par Vallet et al. (2013) n'est malgré tout pas meilleure. Cela est probablement dû à deux raisons qui s'entremêlent. D'abord le recul sur les données est relativement faible (2 ans pour les déplacements de la balise GPS2 – 3,5 ans pour la microsismicité) ce qui limite les approches par agrégation des données sur des périodes de quelques semaines à mois. Ensuite, les mesures considérées sont acquises sur une période où la dégradation ainsi que la réactivité du massif semblent s'accélérer considérablement comme le montrent à la fois les données collectées (+220% de microsismicité entre 2011 et 2012, +100% de déplacement à la balise GPS2 en 1 an) et l'évolution des signatures microsismiques enregistrées (les signaux de type tremors représentaient 65% des enregistrements en 2011 contre plus de 90% au 1<sup>er</sup> semestre 2013). La modélisation des séries chronologiques dans ces conditions est de fait problématique.

### 3.2 Détection de situations à risque

La figure 3 présente les ruptures de pentes convexes sur les séries du déplacement cumulé et de l'activité microsismique cumulée.

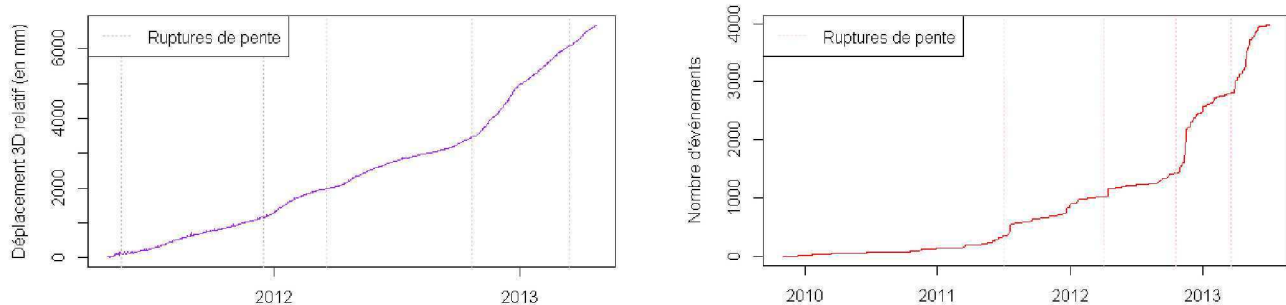


Figure 3. Matérialisation des ruptures de pentes convexes : à gauche sur la série du déplacement cumulé enregistré par la balise GPS2 (pour mémoire, cette balise est fonctionnelle d'avril 2011 à avril 2013), à droite sur la série microsismique (toute signature confondue) du 20/11/2009 au 30/06/2013.

L'approche proposée pour la détection des situations à risques est plutôt efficace. Sur la chronique microsismique, la plus longue, on relève 4 périodes significatives d'accélération : elles interviennent les 04/07/2011, 04/04/2012, 18/10/2012 et 18/03/2013. Pour la série des déplacements, elles sont détectées les 19/05/2011, 16/12/2011, 19/03/2012, 21/10/2012 et 15/03/2013. Sur les 18 derniers mois (l'année 2012 et le premier semestre 2013) les écarts en temps sont relativement courts entre les accélérations en déplacement et accroissement de la microsismicité. En particulier, pour les deux plus récentes, la rupture de pente intervient d'abord sur la microsismicité et 3 jours plus tard sur le déplacement en surface.

## 4 ANALYSE STATISTIQUE ET GESTION DES RISQUES EN TEMPS REEL

L'outil de web-monitoring élaboré par l'INERIS vise à garantir un accès continu et un partage contrôlé des données et métadonnées de manière à permettre le suivi d'expertise en routine ainsi qu'en situation de pré-alerte et de gestion de crise. Il s'appuie sur des fonctionnalités d'édition simple et efficace des données et résultats avancés de traitement et analyse : la restitution est réalisée sous formes de graphes, tableaux de données ou cartes adaptés à chaque projet d'observation ou de surveillance.

L'enrichissement de cet outil par de s fonctionnalités d'analyse statistique devient une nécessité avec la généralisation du monitoring multi-paramètres. Pour rester dans la logique du fonctionnement actuel, les fonctionnalités doivent être déployées pour permettre leur utilisation par un public non averti en analyse de données et non spécialiste de toutes les disciplines couvertes par le monitoring.

A ce stade, nous considérons que l'analyse des co-variations ne peut être intégrée simplement et efficacement. En revanche, la correction des effets saisonnalités (non présentée dans cet article car non utile pour les séries illustrées ici) et la détection des ruptures de pente par l'approche proposée ont vocation à être implémentées à court terme car leur apport pour la compréhension et l'analyse des données est immédiat. En particulier, la détection quasi-simultanée de ruptures de pentes convexes sur différentes chroniques cumulées (nombre d'événements, énergie microsismique, déplacement etc.) peut conduire à la détection fiable de situations à risque.

## 5 CONCLUSIONS

Dans le contexte du mouvement de versant de *Séchilienne*, l'approche classique proposée par Hipel et McLeod (1995) pour analyser des données environnementales complexes ne permet pas de mettre en évidence des corrélations fortes entre les précipitations, la microsismicité et les déplacements mesurés en surface. Dans ces conditions, il ne nous a pas été possible de proposer un modèle prédictif de la microsismicité et des mouvements de surface à partir des précipitations enregistrées sur le site. Ce résultat traduit la difficulté à modéliser les séries chronologiques sur des périodes de temps courtes (2 à 3 ans) dans un contexte où les mécanismes de déformation sont complexes et auto-accélérateurs. Nos travaux actuels visent donc à combiner cette approche avec une modélisation des phénomènes physiques en jeu.

S'agissant du transfert des outils utilisés à l'outil de web-monitoring de l'INERIS pour la gestion des risques de mouvements de terrains, il semble opportun de déployer deux fonctionnalités rapidement. La première concerne la correction des effets de saisonnalités de manière à donner une lecture correcte instantanée des mesures. La seconde concerne la détection de situation de risques basée sur l'identification de ruptures de pente sur une ou plusieurs séries simultanément, selon le contexte.

## 6 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie pour son appui et son soutien financier (via le programme *Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol*) ainsi que l'Agence Nationale de la Recherche (via le projet *SLAMS*). Ils remercient également Marie-Aurélien Chanut (Centre d'Etude Technique de Lyon) et Aurélien Vallet (Université de Franche Comté) qui ont partagé leur expérience ainsi que leurs données et apporté d'utiles conseils techniques et scientifiques.

## 7 REFERENCES

- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. Time Series Analysis : Forecasting and Control. Wiley-Blackwell, 4th Revised Edition, 2008.
- Chanut, M.A. Dubois, L. Duranthon, J.P. Durville, J.L. Mouvement de versant de Séchilienne : relations entre précipitations et déplacements. Acte de colloque, Première conférence internationale sur les risques des mouvements de terrain, Ain Draham (Tunisie), 14 au 16 mars 2013.
- Dünner, C. Klein, E. Charmoille, A. Bigarré, P. Multi-parameter monitoring strategy applied to unstable rock slopes: the example of the Ruines de Séchilienne (Isère, 38). Rock Slope Stability Symposium, 24-25th November 2010, Paris, France.
- Dünner, C. Klein, E. Bigarré, P. Monitoring multi-paramètres du mouvement de versant des Ruines de Séchilienne (Isère, 38). Acte de Colloque, Premières journées « aléa gravitaire », Strasbourg (France), 07 et 08 septembre 2011.
- Helmstetter, A. and S. Garambois, Seismic monitoring of Séchilienne Rockslide (French Alps) : analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, J. Geophys. Res., 115, F03016, doi:10.1029/2009JF001532 (2010).
- Hipel, K.W. McLeod, A.I. Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1995.
- Vallet, A. Bertrand, C. Mudry, J. 2013. Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide – a simple computation temperature based method applied to Séchilienne unstable slope (French Alps), Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 10, 8945-8991, doi:10.5194/hessd-10-8945-2013, 2013.